

## **1. INTRODUCTION**

Investigations into the degradation of materials and components which are exposed to ionizing radiation have been carried out in many applications, such as nuclear reactors, fusion reactors, high-energy accelerators, medical and industrial irradiation facilities, space projects, etc. At the European Organization for Nuclear Research (CERN), radiation damage test studies have been centred on organic and inorganic materials, electronic and optical components and devices, and other materials that are used in the construction and operation of high-energy accelerators and particle detectors.

Apart from electronic and optical devices, the organic materials are the ones most sensitive to radiation. As a consequence of this, a large number of radiation tests have been made on these materials and the results are extensively documented [e.g. 1–23]. Design engineers are, however, often faced with the problem of finding the desired information quickly within the available literature. We therefore decided to publish our radiation damage test results on organic materials in the form of catalogues.

The first catalogue, published more than fifteen years ago, concerned organic materials used as insulation and sheathing for electric cables [24].

The second dealt with thermosetting and thermoplastic resins, the majority being epoxies used for magnet coil insulations [25].

The third contained information on miscellaneous materials and components used around high-energy accelerators [26].

A second edition of the first catalogue was published in 1989 and concerns halogen-free cable-insulating materials [27].

The present volume is the second edition of the second part and concerns result of thermoset and thermoplastic resins and composite materials which were tested in the meantime.

As in the previous editions, the materials are presented in alphabetical order.

## **1. INTRODUCTION**

Des essais sur la dégradation des matériaux due aux rayonnements ionisants ont été effectués dans plusieurs domaines d'application, par exemple autour des réacteurs nucléaires et de fusion, des accélérateurs à haute énergie, dans les installations industrielles ou médicales, dans les centres d'études spatiales, etc. A l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN), les essais de radiorésistance ont été concentrés sur des matériaux organiques et inorganiques, des composants électroniques et optiques, et d'autres matériaux qui sont utilisés pour la construction et l'opération des accélérateurs à haute énergie et les détecteurs de particules.

A part les composants électroniques et optiques, les matériaux organiques sont parmi les plus sensibles aux rayonnements ionisants. Par conséquent, une grande quantité de ces matériaux ont été soumis à des essais d'irradiation, et les résultats peuvent être trouvés dans de nombreuses publications [par exemple 1–23]. Toutefois, les ingénieurs rencontrent souvent des difficultés pour trouver, dans la littérature, l'information voulue. C'est pour cette raison que nous avons décidé de publier nos résultats d'essais de radiorésistance des matériaux organiques sous forme de catalogues.

Le premier catalogue, paru il y a plus de quinze ans, concernait les matériaux utilisés comme isolants, ainsi que pour les gaines de câbles électriques [24].

Le deuxième concernait des résines thermodurcies et thermoplastiques dont la plupart sont des époxides utilisées dans l'isolation de bobines d'aimants [25].

Le troisième concernait divers matériaux et composants utilisés autour des accélérateurs de particules [26].

Une seconde édition du premier catalogue, publiée en 1989 portait sur les matériaux pour isolations et gaines de câbles exempts d'halogène [27].

Le présent volume est une seconde édition du deuxième ; il contient des informations sur des résines thermoplastiques et thermodurcies, ainsi que sur des matériaux composites.

Comme dans chaque édition, les matériaux sont présentés dans l'ordre alphabétique suivant leur nom anglais.

We first present some characteristic properties of the materials, and define our end-point criteria for the selection of radiation-resistant materials. We then list the tests and test methods, and give the irradiation conditions. In Section 5 we explain the presentation of the data. It should be noted that most of the data have been obtained from tests after accelerated irradiations, and that all tests were made at ambient temperature. After long exposures and ageing in other environments, a variation in the data presented may be expected; this is mainly the case for thermoplastic materials [9, 12, 18–23]. Test results at cryogenic temperatures can be found in Refs. [30–35].

## 2. MATERIALS, CHARACTERISTIC PROPERTIES, AND END-POINT CRITERIA

With a few exceptions, which are marked in the catalogue, all the test data given here have been obtained, over the past fifteen years, from commercially-available materials. Some of these materials may no longer be available and this is indicated in the tables when known. The most common materials that are dealt with here are:

- epoxy resins,
- polyester resins,
- polyurethanes,
- rigid and high performance thermoplastics.

The materials were usually supplied by European manufacturers involved in submitting offers and/or supplying components for the construction at CERN of the Large Electron–Positron storage ring (LEP), and for the Large Hadron Collider (LHC) project.

Some characteristic physical, mechanical, and electrical properties of thermoset resins are summarized in Table 1. These values are only a general indication since they depend on numerous parameters such as the composition and quantity of the base resin, the hardener, the accelerator, the filler, and other additives, as well as on the curing conditions, etc.

Most of the materials presented in this catalogue and all of the thermoplastics unless

Nous commençons par exposer quelques propriétés caractéristiques des matériaux présentés dans ce catalogue ; nous définissons les critères de dégradation de ces propriétés, qui servent à sélectionner les matériaux radiorésistants. Nous décrivons ensuite les méthodes d'essais, ainsi que les conditions d'irradiation. Dans la Section 5 nous expliquons la présentation des données. Il faut noter que les résultats ont généralement été obtenus par des irradiations accélérées, et que tous les essais ont été faits à température ambiante. Après une longue période d'irradiation et un vieillissement sous d'autres conditions, on peut s'attendre à un changement dans les résultats que nous avons obtenus, surtout pour les thermoplastiques [9, 12, 18–23]. Des résultats de tests à température cryogénique peuvent être trouvés aux références [30–35].

## 2. LES MATERIAUX, LEURS PROPRIETES CARACTERISTIQUES ET LES CRITERES DE DEGRADATION DE CES PROPRIETES

A part quelques exceptions, qui sont indiquées dans le catalogue, tous les résultats donnés ont été obtenus, au cours des quinze dernières années, sur des matériaux disponibles dans le commerce. Il est possible que quelques-uns ne soient plus sur le marché, et nous l'avons noté dans les tableaux, pour les cas où nous l'avons su. Les plus courants de ces matériaux sont :

- résines époxydes
- résines polyestères
- polyuréthanes
- thermoplastiques rigides et hautes performance.

En général, les matériaux ont été fournis par des fournisseurs européens qui ont été engagés dans des offres ou des fournitures de matériels pour la construction au CERN du Large Electron-Positron Collider (LEP), ou pour le projet LHC (Large Hadron Collider), grand collisionneur de protons, supraconducteur.

Le tableau 1 donne un résumé des quelques propriétés mécaniques, électriques et physiques des résines thermodurcies. Ces valeurs peuvent seulement servir d'indication générale, puisqu'elles dépendent de nombreux paramètres tels que la composition et la quantité de la résine de base, du durcisseur et de l'accélérateur, ainsi que les charges et d'autres additifs.

otherwise stated, are halogen-free and contain little or no sulphur and phosphorus. They have passed the IEC 754–2 test which defines the maximum acidity and the maximum conductivity of combustion gases [28].

It is clear that when selecting and classifying materials according to their radiation resistance, not all of the properties listed in Table 1 could be tested, and we had to restrict ourselves to a few of the most characteristic and representative ones. For our purposes the mechanical properties were chosen. This choice can be justified by our own experience and that of others [10, 22, 29]. In general the mechanical degradation of plastic insulating materials due to ionizing radiation occurs before the degradation of the electrical and physical properties. Also, no important change in flammability was observed with radiation.

It should be noted that the mechanical properties of polymeric materials depend strongly on the temperature; at cryogenic temperature the stiffness and the brittleness are increased, and the plasticity and the impact strength are reduced. Irradiation of these materials either at low temperature or at room temperature does not influence their degradation: the mechanical properties of polymer-based materials are more influenced by the test temperature than by the irradiation temperature. A characteristic case is that of materials sensitive to oxido-degradation: the degradation is lower if they are irradiated in a cryogenic fluid rather than in air [30–35].

### 3. TESTS AND TEST METHODS

Whenever possible, the tests were carried out according to international norms [29]. Sometimes exceptions had to be made for practical or technical reasons, e.g. sample size, dose rate during irradiation, etc. The test samples, usually five per test, were cut from 2–6 mm thick plates molded from the respective materials.

Flexion tests were performed on an Instron testing machine to determine the breaking-strength and deflection at the breaking point.

Soulignons que la plupart des matériaux présentés dans ce catalogue, et en tout cas les thermoplastiques, sauf mention contraire sont exempts d'halogène et ne contiennent que peu ou pas de soufre ou de phosphore. Ils passent le test IEC 754–2 qui définit une acidité et une conductivité maximales des gaz de combustion [28].

Il est évident que, pour la sélection et la classification des matériaux selon leur résistance aux rayonnements, on ne peut pas tester toutes les propriétés citées dans le tableau 1, il faut se limiter à quelques-unes des plus représentatives. Dans le cas présent, nous avons choisi les propriétés mécaniques. Ce choix se justifie par notre propre expérience, et celle d'autres auteurs, qui nous a appris que la dégradation, due à l'irradiation, des propriétés mécaniques des isolants plastiques intervient généralement avant celle de leurs propriétés électriques et physiques [10, 22, 29]. D'autre part, les rayonnements n'ont que peu d'effet sur l'inflammabilité de ces matériaux.

Remarquons que les propriétés mécaniques des matériaux polymériques dépendent fortement de la température d'utilisation ; à température cryogénique la rigidité et la fragilité sont accrues, la plasticité et la résistance au chocs sont diminuées. Le fait d'irradier ces matériaux à basse température ou à température ambiante n'influe pas sur leur dégradation : les propriétés mécaniques des matériaux polymériques sont plus influencées par la température de test que par la température d'irradiation. Un cas particulier est celui des matériaux sensibles à l'oxydo-dégradation : lorsqu'ils sont irradiés dans un fluide cryogénique, leur dégradation est moindre que lorsqu'ils sont irradiés dans l'air [30–35].

### 3. ESSAIS ET MÉTHODES D'ESSAIS

Nous avons exécuté nos essais selon les normes internationales [29] dans tous les cas où cela était possible. Pour des raisons pratiques ou techniques, quelques exceptions étaient inévitables, par exemple dimension d'échantillons, débit de dose pendant l'irradiation, etc.

Les matériaux ont été fournis sous forme de plaques de 2 à 6 mm d'épaisseur, dans lesquelles, en général, cinq échantillons ont été coupés pour chaque essai.

From these measurements, the ultimate flexural strength, the deformation at break and the modulus of elasticity were calculated.

The testing method was a three-point loading system utilizing a centre load on the supported sample according to ASTM norm D790. The distance between the two supports was 67.0 mm and the speed of the central point was 2 mm/min for most of the materials. It was 5 mm/min for some very supple materials which undergo an important deformation. Some of these latter materials did not break during the test (the maximum value of the deformation appears in the tables). In this case, the flexural strength is the maximum recorded value, and not at the breaking point.

According to the recommendations of the International Electrotechnical Commission (IEC) [29], the most radiation-sensitive property is chosen as the reference critical property. For most of the thermoset resins and composites this critical property is the flexural strength, while for most of the thermoplastics it is the deflection [36]. The end-point criterion is 50% of the initial value of the critical property.

The Radiation Index (RI) is defined in IEC 544–4 as the logarithm, base 10, of the absorbed dose in grays (rounded down to two significant digits) at which the critical property is reduced to 50% of its initial value, under specified conditions of irradiation and tests.

#### 4. IRRADIATION CONDITIONS AND DOSIMETRY

Most of the samples were irradiated in the ASTRA reactor at Seibersdorf (Austria) to doses between  $5 \times 10^6$  Gy and  $10^8$  Gy, at dose rates of about  $2 \times 10^5$  Gy/h.

In this 7 MW pool reactor, the irradiation position ‘Ebene 1’ is in the pool about 26 cm away from the reactor core. The neutron dose is less than 5% of the total dose to the samples. The irradiation medium is air, and the temperature is kept below 60°C.

More sensitive samples were irradiated with a  $^{60}\text{Co}$  source, at Ionisos in Dagneux (France),

Des essais de flexion ont été effectués sur une machine Instron qui ont permis de déterminer la force ainsi que la déflexion à la rupture. Ensuite nous avons calculé la résistance à la flexion, la déformation et le module d'élasticité.

La méthode d'essai était un système d'appui à trois points : la force est appliquée sur le point central, selon la norme ASTM D790. La distance entre les deux points d'appui était de 67,0 mm, et la vitesse d'avancement du point central était de 2 mm/min pour la plupart des matériaux, elle était de 5 mm/min pour certains matériaux particulièrement souples à forte déformation. Certains de ces derniers n'ont pas subi de rupture lors des tests. La valeur maximale de la déformation apparaît dans les tables. Dans ce cas, la résistance à la flexion n'est pas calculée à la rupture, mais est la valeur maximale enregistrée au cours de l'essai.

Conformément aux recommandations de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) [29], on choisit comme propriété critique de référence celle qui est la plus sensible aux radiations. Pour les thermosatures et les composites, il s'agit en général de la résistance à la flexion ; pour les thermoplastiques, il s'agit plutôt de la déflexion [36]. Le critère de fin de vie est 50 % de la valeur initiale de la propriété critique.

La publication CEI 544–4 définit un indice de rayonnement (RI) déterminé par le logarithme, en base 10, de la dose absorbée en grays (arrondi à deux chiffres significatifs) au-dessus de laquelle la valeur de la propriété critique a atteint 50 % de sa valeur initiale, dans les conditions spécifiques d'irradiation et de test.

#### 4. CONDITIONS D'IRRADIATION ET DOSIMÉTRIE

La plupart des échantillons ont été irradiés au réacteur ASTRA, à Seibersdorf (Autriche), à des doses de  $5 \times 10^5$  Gy à  $10^8$  Gy, où le débit de dose est de l'ordre de  $2 \times 10^5$  Gy/h.

Dans ce réacteur-piscine de 7 MW, la position “Ebene 1” se trouve à 26 cm du cœur ; la dose en neutrons intégrée par les échantillons est inférieure à 5 % de la dose totale. Le milieu d'irradiation est l'air, et la température maximale est de 60°C.

Les échantillons plus sensibles ont été irradiés par une source de  $^{60}\text{Co}$ , à la société Ionisos à

with doses of  $2 \times 10^5$  Gy,  $5 \times 10^5$  Gy, and  $10^6$  Gy, at a dose rate of about 4000 Gy/h. In a cobalt source, the radiation comes from pure gamma rays of 1.17 and 1.25 MeV.

Some samples were irradiated in the CERN accelerators, either close to the magnet coils which are insulated with the material concerned (we call this ‘live irradiation’), or around converting targets. Under these conditions, the neutron dose may be of the order of several tens of per cents of the total dose.

More details about irradiation conditions and dosimetry in the ASTRA reactor are given in Ref. [37] and for other sources in Ref. [38]. (Note that 1 Gy = 1 gray = 1 J/kg = 100 rad.)

## 5. PRESENTATION OF THE DATA

The lists of the materials that are presented in this catalogue and in the preceding volumes are given in Appendix 1.

Appendix 2 gives the chemical structures of some commercial products.

Appendix 3 is the alphabetical compilation of data where the materials are sorted according to their chemical name. Under each letter, the following information can be found:

- A generic page with the chemical names of the materials, as well as their usual and commercial names (with as many cross-references as possible). If specific results are not given in this volume, an indication of the radiation resistance is given by the value of the radiation index.
- On the verso of this generic page, the list of the materials classified under the given letter, together with their CERN identification number.
- In the individual pages of results, a header gives the TIS reference number, the description of the material and the name of the supplier (Appendix 5). If available, an indication of the fire behaviour is also given. The results are presented in the form of a table and graph. The mean values (and the standard deviation) of the mechanical properties, flexural strength (S), deformation at break ( $\epsilon$ ) and flexural modulus (M) appear in the table

Dagneux, France, à des doses de  $2 \times 10^5$  Gy,  $5 \times 10^5$  Gy et  $10^6$  Gy, à un débit de dose de l’ordre de 4000 Gy/h. Dans une source cobalt, l’irradiation est purement électromagnétique, avec des gammas de 1,17 et 1,25 MeV.

Certains échantillons ont été irradiés dans des accélérateurs du CERN, soit près des bobines d’aimants dont les bobines sont isolées avec le matériau concerné (test avec irradiation à long terme). Dans ces conditions, la dose-neutron peut atteindre plusieurs dizaines de pourcents de la dose totale.

Plus de détails sur les conditions d’irradiation et de dosimétrie peuvent être trouvés dans les références [37] pour le réacteur ASTRA et [38] pour les autres sources. (Pour mémoire : 1 Gy = 1 gray = 1 J/kg = 100 rad.)

## 5. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les listes des matériaux pour lesquels nous donnons des résultats ainsi que ceux présentés dans les volumes précédents constituent l’appendice 1.

L’appendice 2 donne les structures chimiques de quelques composés commerciaux.

L’appendice 3 est la compilation alphabétique des résultats où les matériaux sont classés suivant leurs noms chimiques en Anglais. Sous chaque lettre on peut trouver les informations suivantes :

- La page générique avec les noms chimiques des matériaux, mais aussi leurs noms usuels ou commerciaux (nous avons fait autant de recoupements que possible). Si des résultats spécifiques ne sont pas présentés dans ce volume, une indication de la radiorésistance est donnée par l’indice de rayonnement.
- Au verso de cette page générique, la liste avec les numéros d’identification CERN des matériaux classés sous cette lettre.
- Viennent ensuite les pages individuelles de résultats, sur lesquelles on trouve en tête le numéro d’identification TIS, la description du matériaux et le nom du fournisseur (Annexe 5), ainsi qu’une éventuelle indication sur son comportement au feu. Les résultats sont présentés sous forme de tableau et de graphique. Dans le tableau apparaissent les doses absorbées avec les débits de dose correspondants, puis les valeurs moyennes (et l’écart type) des propriétés mécaniques, la

together with the absorbed doses and the corresponding dose rates. (The formulae for the calculation of these properties are given in Appendix 4. In some cases, the samples are too flexible to break during the test, the values given are then the maximum flexural strength and the maximum possible deformation in the cage.) Below the table are given the critical property for the calculation of the radiation index (RI) and its value for the corresponding dose rate. The graph presents the evolution of the flexural strength and of the deformation with respect to the absorbed dose.

Appendix 4 gives the main abbreviations used in the tables of results.

Appendix 5 is a list of the suppliers of the materials and/or components who contributed to this catalogue.

## 6. CLASSIFICATION OF MATERIALS

Tables 2a and 2b are a classification of the material in decreasing order of their radiation resistance. We have separated the thermoplastics from the thermosets because their conditions of use are usually different, though high-performance thermoplastics have properties as good as the ones of thermosets today.

This classification gives an order of magnitude of the maximum dose of usability of the materials; it corresponds to long-term irradiations. In particular, thermoplastics (Table 2a) may be very sensitive to oxidation and hence to dose-rate effect; during long-term irradiation in the presence of oxygen, their degradation starts at much lower doses [17–23]. An indication of this appears as a longer ‘mild to moderate’ zone on the bar graph.

All of these materials may be reinforced with fibres, long or short, oriented (1D, 2D, 3D) or not, woven or not, etc. The fibres usually increase the radiation resistance of the materials. The properties of some composites reinforced with glass fibres or carbon fibres may be kept up to doses above 100 MGy. A laminate will undergo degradation following delamination, showing the higher sensitivity of the matrix.

résistance en flexion (S), la déformation à la rupture ( $\epsilon$ ) et le module de flexion (M) (Les formules de calcul de ces grandeurs sont données en appendice 4. Dans certains cas, les échantillons sont trop flexibles pour subire une rupture, la valeur maximale de la déformation atteinte dans la cage est alors donnée, ainsi que la valeur maximale mesurée pour la résistance.) Sous le tableau sont données les propriétés de référence pour le calcul de l'indice de rayonnement (RI) et la valeur de celui-ci au débit de dose correspondant. Le graphique présente l'évolution de la résistance et de la déformation en fonction de la dose absorbée.

L'appendice 4 explique les principales abréviations utilisées dans les tableau de résultats.

L'appendice 5 est une liste des fournisseurs des matériaux de base et/ou de composants qui ont collaboré à ce catalogue.

## 6. CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX

Les tableaux 2a et 2b sont un classement des matériaux par ordre décroissant de leur résistance aux radiations. Nous avons séparé les thermoplastiques des thermosets, car ils ont en général des conditions d'utilisation différentes, bien que les thermoplastiques à hautes performances aient aujourd'hui des propriétés comparables à celles des thermosets.

Ce classement donne un ordre de grandeur de la dose limite d'utilisation d'un matériau, il correspond à des irradiations accélérées. En particulier, les thermoplastiques (Tableau 2a) peuvent être très sensibles à l'oxydation et donc à l'effet du débit de dose ; en irradiation à long terme en présence d'oxygène, leur dégradation intervient pour des doses nettement plus faibles [17–23]. Une indication de ceci apparaît comme une zone de “dégradation modérée” plus longue sur le graphique.

Tous ces matériaux peuvent être renforcés par des fibres, courtes ou longues, orientées (1D, 2D ou 3D) ou non, tissées ou non, etc. Les fibres ont en général un effet bénéfique sur la résistance aux radiations d'un matériau. Les propriétés de certains composites renforcés aux fibres de verre ou de carbone peuvent être conservées à des doses de plus de 100 MGy. Un composite laminé subira une dégradation par délamination, mettant ainsi en évidence la plus grande sensibilité de la matrice.

## Acknowledgements

This data compilation was carried out within the framework of an IAEA Research Coordination Programme on Radiation Degradation of Polymers (Contract No. 4319, 1985 to 1989).

Our particular thanks are due to K. Goebel, K. Potter and B. de Raad at CERN who throughout the years have supported radiation-damage studies.

Most of the materials tested were used or proposed for the SPS and LEP, as well as for the LHC project at CERN. We thank the European manufacturers who supplied the test samples, both for their interest in the subject and for the useful discussions that we had with many of them.

The irradiations were carried out in the ASTRA reactor of the Forschungszentrum Seibersdorf in Austria, where the collaboration of A. Burtscher and J. Casta was greatly appreciated. We would also like to thank Mrs M-A. Mirvault and Mrs M.-O. Bachelier from Ionisos in Dagneux, France.

Finally, we would like to thank the CERN Desktop Publishing Service for their help in preparing this report.

## Remerciements

Cette compilation de résultats s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche sur la dégradation des polymères par irradiation, coordonné avec l'AIEA (contrat No. 4329, 1985 à 1989).

Nous remercions particulièrement K. Goebel, K. Potter and B. de Raad, du CERN, qui, au long des années ont soutenu les études de dégradation des matériaux due aux rayonnements.

La plus grande partie des matériaux testés ont été utilisés ou proposés pour le SPS et pour le LEP, ainsi que pour le projet LHC du CERN. Nous remercions les fabricants européens qui ont fourni des échantillons d'essais ; nous avons eu des discussions utiles avec les représentants de nombreuses firmes.

Les irradiations ont été effectuées au réacteur ASTRA du Forschungszentrum Seibersdorf en Autriche, où nous avons apprécié la collaboration que nous ont offerte J. Casta et F. Böheim, et à Ionisos, à Dagneux, France où nous remercions Mmes M.A. Mirvault et M.-O. Bachelier.

Nous voudrions enfin exprimer notre appréciation de l'aide et l'attention du Service de publication assistée par ordinateur du CERN.

## References

- [1] M.H. Van de Voorde, The effect of nuclear radiation on the electrical properties of epoxy resins, CERN 68–13 (1968).
- [2] M.H. Van de Voorde, Effects of radiation on materials and components, CERN 70–5 (1970).
- [3] M.H. Van de Voorde, Action des radiations sur les résines époxydes, CERN 70–10 (1970).
- [4] M.H. Van de Voorde and C. Restat, Selection guide to organic materials for nuclear engineering, CERN 72–7 (1972).
- [5] H. Schönbacher, Anwendung von Kabel und Magnet-isolationen im nuklearen Strahlungsfeld von über 1 Megagray, Bull. Assoc. Suisse Electr. **69** (1977) 72.
- [6] D.C. Phillips, The effects of radiation on electrical insulators in fusion reactors, AERE-R8923 (UK Atomic Energy Authority, Harwell, 1978).
- [7] D.C. Phillips et al., The selection and properties of epoxide resins used for the insulation of magnet systems in radiation environments, CERN 81–05 (1981).
- [8] R.I. Keiser and M. Mottier, Radiation resistant magnets, CERN 82–05 (1982).
- [9] R.L. Clough et al., Accelerated aging tests for predicting radiation degradation of organic materials, Nucl. Saf. **25** No. 2 (1984) 238.
- [10] G. Lipták et al., Radiation tests on selected electrical insulating materials for high-power and high-voltage application, CERN 85–02 (1985).
- [11] H. Schönbacher et al., Strahlenbeständigkeit von Epoxidhormasse, Kunstst.-Berat. **76** (1986) 14.
- [12] P. Beynel, H. Schönbacher, G. Tartaglia, Results of long-term irradiation of epoxy resins used for magnet-coil insulation, CERN-TIS-RP/IR/86–37.
- [13] H. Schönbacher, Life experience with aging of organic electrical insulating materials in nuclear radiation environment, Proc. ANS/ENS Int. Topical Meeting on Operability of Nuclear Power Systems in Adverse Environments, LaGrange Park, 1987, p. 516.
- [14] R.L. Clough, Radiation resistant polymers, in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering (John Wiley & Sons, New York, 1988).
- [15] Proc. Research Coordination Meeting on Radiation Damage to Organic Materials in Nuclear Reactor and Radiation Environment, Takasaki, 1989 (IAEA Tech. Rep. Ser., Vienna, 1990).
- [16] Radiation damage to organic materials in nuclear reactors and radiation environments, IAEA-TECDOC-551 (1990).
- [17] M. Taylet and H. Schönbacher, Radiation resistance of insulators and structural materials, Proc. ECFA Large Hadron Collider Workshop, Aachen, 1990, Eds. G. Jarlskog and D. Rein, CERN 90–10, Vol. 3 (1990) p. 743–8.
- [18] D.W. Clegg and A.A. Collyer, Irradiation effects on polymers (Elsevier Appl. Sci., London and New York, 1991).
- [19] R.L. Clough and S.W. Shalaby, Radiation effects on polymers (ACS Symposium Series 475, 1991).
- [20] R.L. Clough and S.W. Shalaby, Irradiation of polymers (ACS Symposium Series No. 620, 1996).
- [21] Proc. Int. Workshop on Advanced Materials for High Precision Detectors, Archamps, 1994, Eds. B. Niquevert and C. Hauviller, CERN 94–07, Part IV (1994).
- [22] H. Mitsui et al., Synchrotron radiation damage test on insulating materials in the Tristan MR, Part. Accel. **52** (1996) 31–44.

- [23] M. Tavlet, Aging of organic materials around high-energy particle accelerators, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **131** (1997) 239–244.
- [24] H. Schönbacher and A. Stolarz-Izicka, Compilation of radiation damage test data, Part I: Cable-insulating materials, CERN 79–04 (1979).
- [25] H. Schönbacher and A. Stolarz-Izicka, Compilation of radiation damage test data, Part II: Thermosetting and thermoplastic resins, CERN 79–08 (1979).
- [26] P. Beynel, P. Maier and H. Schönbacher, Compilation of radiation damage test data, Part III: Materials used around high-energy accelerators, CERN 82–10 (1982).
- [27] H. Schönbacher and M. Tavlet, Compilation of radiation damage test data, Part I, 2nd edition: Halogen-free cable-insulating materials, CERN 89–12 (1989).
- [28] CERN Safety Instructions IS23 and IS41, TIS Commission 1993 and 1995.
- [29] International Electrotechnical Commission, Geneva, Publication No. 544: Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials, Part I: Radiation interaction, Ref. 544–1 (1977); Part 2: Procedures for irradiation, Ref. 544–2 (1979); Part 3: Test procedures for permanent effects, Ref. 544–3 (1979); Part 4: Classification system for service in radiation environments, Ref. 544–4 (1985).
- [30] M. Van de Voorde, Low temperature irradiation effects on materials and components for superconducting magnets for high-energy physics applications, CERN 77–03 (1977).
- [31] D. Evans and J.T. Morgan, A review of the effects of ionizing radiation on plastics materials at low temperature, *Adv. Cryog. Eng.* **28** (1982) 147–164.
- [32] A. Spindel, Report on the program of 4 K irradiation of insulating materials for the SSC, SSCL–635 (1993).
- [33] K. Humer et al., Tensile strength of fiber reinforced plastics at 77 K irradiated by various radiation sources, *J. Nucl. Mater.* **212–215** (1994) 849–853.
- [34] S. Egusa, Irradiation effects on the mechanical properties of polymer matrix composites at low temperature, *Adv. Cryog. Eng.* **36** (1990) 861–868.
- [35] H. Schönbacher et al., Results of radiation tests at cryogenic temperatures on some selected organic materials for the LHC, CERN 96–05 (1996).
- [36] M. Tavlet and A.-S. Boullin, End-of-Life criteria for rigid plastics undergoing radiation degradation, CERN–TIS-CFM/IR/95–05, presented at the Working Group of IEC Subcommittee 15 B, Milan, June 1995.
- [37] H. Schönbacher et al., Study on radiation damage to high-energy accelerator components by irradiation in a nuclear reactor, *Kerntechnik* **17** (1975) 268.
- [38] E. Leon Florian, H. Schönbacher and M. Tavlet, Data compilation of dosimetry methods and radiation sources for material testing, CERN/TIS–CFM/IR/93–03 (1993).

**Table 1** Characteristic properties of thermoset and thermoplastic materials

Properties	EPOXY RESINS						PEEK	
	BISPHENOL A			EPOXY NOVOLAC				
	No filler	Glass	Mineral	No filler	Glass	Mineral	Unfilled	30% G.F.
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 1183	1.15	2.0–2.1	1.8–2.0	1.2	1.97	1.7	1.32
Water absorption (%)	ISO 62	0.1–0.2	0.02–0.8	0.30–0.80	—	0.04–0.06	0.11–0.20	0.06–0.2
Thermal conductivity (k cal/m.h. °C)	ASTM D325	0.15–0.45	1	—	—	—	—	—
Thermal coefficient of expansion (10 <sup>-5</sup> /°C)	ASTM D 696	6	0.6	—	3	—	—	5
Tensile strength (MPa)	ISO R37	70–80	350–400	70	70	350–400	38	95
Elongation (%)	ISO R37	4.4	—	—	2–5	—	—	>25
Tensile modulus (GPa)	ISO R37	3.5	30	10–15	3.5	21–22	—	3.6
Flexural strength (MPa)	ISO 178	80–130	360	150–170	60–100	390	70–80	180
Impact strength (notched) (kg cm/cm)	ASTM D 256	1.1–2.7	6.4–8.2	2.2–2.7	2.7	7.0–9.2	2.2–2.7	—
Volume resistivity (Ω cm)	IEC 93	6.1 × 10 <sup>15</sup>	—	1.5 × 10 <sup>15</sup>	2.1–10 <sup>14</sup>	—	1.4–5.5 × 10 <sup>14</sup>	10 <sup>16</sup>
Dielectric strength (kV/mm)	IEC 243	>16	18–22	15–16	—	—	12–16	30
Power factor (tg) at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	0.032	0.024	0.013	0.029	0.015	—	0.003
Dielectric constant at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	3.4	4.7–4.8	4.1–4.6	3.5	5.1	4.3–4.8	3.3
Heat distortion temperature (°C)	ISO 75	110	—	—	150–200	—	—	340

Table 1 (cont.)

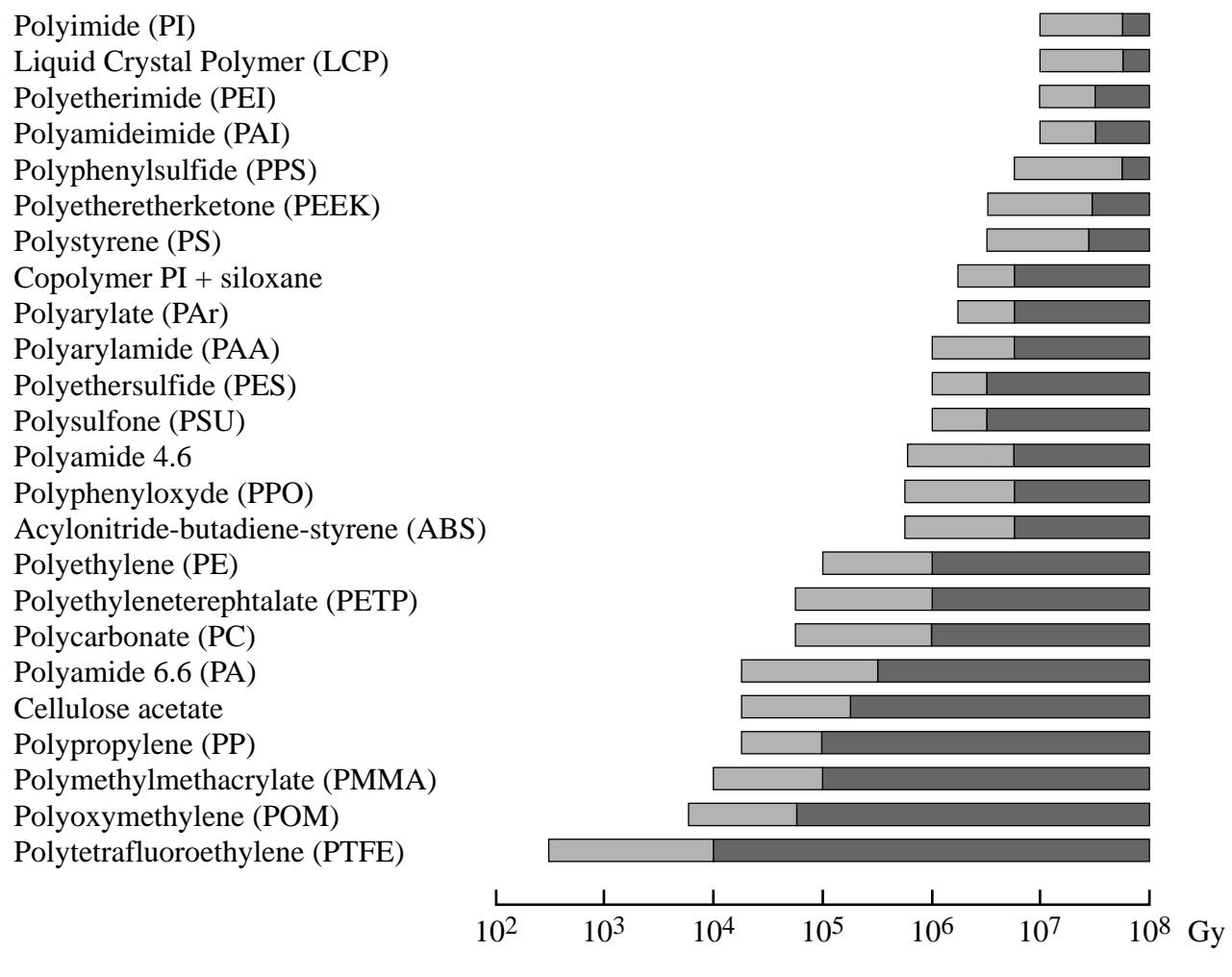
Properties		Polymers		PHENOLICS				POLYMIDES	
		No filler	Wood flour	Asbestos	Fibre and fabric	Mineral	Nylon	Unfilled	Glass
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 1183	1.30–1.32	1.29–1.51	1.78–2.00	1.3–1.4	1.5–1.9	1.2–1.5	1.47	1.90
Water absorption (%)	ISO 62	0.30–0.40	0.70–1.20	0.03–0.30	0.50–1.6	0.04–0.25	0.25–0.4	0.68	0.20
Thermal conductivity (k cal/m.h. °C)	ASTM D325	—	0.15–0.45	0.15–0.25	0.3	0.3	—	0.60	—
Thermal coefficient of expansion (10 <sup>-5</sup> /°C)	ASTM D 696	4.3	3.6	—	3	1.8	—	5.4	1.5
Tensile strength (MPa)	ISO R37	14–63	38–63	21–49	31–63	14–59	31–63	74	210
Elongation (%)	ISO R37	~5	~5	~5	~5	4–9	—	<1.5	<1
Tensile modulus (GPa)	ISO R37	1.4–3.1	4.9–14.0	11–20.0	5.6–10.0	9.5–21.0	2.8–14.0	3.2	28–30
Flexural strength (MPa)	ISO 178	84–100	60	45–77	49–110	56–84	42–91	100	350
Impact strength (notched) (kg cm/cm)	ASTM D 256	2.7–4.3	1–2.8	0.8–16	2–36	0.97–3.9	1.4–2.8	5	17
Volume resistivity (Ω cm)	IEC 93	2.5 × 10 <sup>10</sup> –10 <sup>12</sup>	10 <sup>9</sup> –10 <sup>13</sup>	10 <sup>8</sup> –10 <sup>13</sup>	10 <sup>8</sup> –10 <sup>12</sup>	10 <sup>10</sup> –10 <sup>14</sup>	10 <sup>11</sup> –10 <sup>14</sup>	10 <sup>16</sup> –10 <sup>17</sup>	9.2 × 10 <sup>15</sup>
Dielectric strength (kV/mm)	IEC 243	10–16	0.6–10	0.4–10	0.4–7	3–16	1–11	22	—
Power factor (tg) at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	0.04–0.05	0.015–0.06	0.03–0.25	0.03–0.08	0.007–0.08	0.15–0.2	0.005	0.0055
Dielectric constant at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	4–9.7 (10 <sup>3</sup> c/s)	3.9–6.5	5–6	4.8–7	4–6	3.7–4.5	3.4	4.7
Heat distortion temperature (°C)	ISO 75	150–180	130–180	—	250	180–200	—	300	350

**Table 1 (cont.)**

Properties	Polymers			POLYESTERS			POLYURETHANES			SILICONES		
	$\alpha$ Cellulose	Mineral	Glass	No filler			Glass		Mineral			
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 1183	1.35–1.40	1.70–2.20	1.20–2.00	1.20–1.40	1.21	1.88		1.88–2.8			
Water absorption (%)	ISO 62	0.01–1	—	0.1–2	0.03–0.4	0.30–0.90	0.10–0.30	0.05–0.22				
Thermal conductivity (k cal/m.h. °C)	ASTM D325	—	—	1.8–2.2	0.15	—	0.27	0.50				
Thermal coefficient of expansion (10 <sup>-5</sup> /°C)	ASTM D 696	—	—	2	7	—	6	5				
Tensile strength (MPa)	ISO R37	42–50	21–46	42–90	35–81	45–60	28–56	17–31				
Elongation (%)	ISO R37	—	—	0.3–0.5	1.7–2.6	>	<3	<3				
Tensile modulus (GPa)	ISO R37	—	9.8–19.0	4.2–12.0	2.8–4.6	3.3–8.4	14.7–17.5	8.7–15.9				
Flexural strength (MPa)	ISO 178	70–84	17–63	84–150	45–91	—	91	49				
Impact strength (notched) (kg cm/cm)	ASTM D 256	1.6–2.5	1–4	40–54	1.6–10	>5.4	50	2				
Volume resistivity ( $\Omega$ cm)	IEC 93	>10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>	10 <sup>12</sup> –10 <sup>15</sup>	2.7 × 10 <sup>14</sup> 2 × 10 <sup>15</sup>	6 × 10 <sup>12</sup> –10 <sup>14</sup>	3 × 10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>				
Dielectric strength (kV/mm)	IEC 243	10–14	10–17	6–14	10–17	20	10–11	11–16				
Power factor (tg) at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	0.03–0.05	0.013–0.04	1.1–0.04	0.01–0.03	0.03–0.05	0.003–0.02	0.002–0.01				
Dielectric constant at 10 <sup>6</sup> Hz	IEC 250	3.5–5.5	4.5–6.0	4.5–6.0	3.0–4.01	3.3–3.9	4.35	3.4–4.5				
Heat distortion temperature (°C)	ISO 75	—	—	200	50–200	—	>450	270–450				

**Table 2a**

General classification of rigid thermoplastics with respect to their radiation resistance



mild to moderate damage, utility is often satisfactory



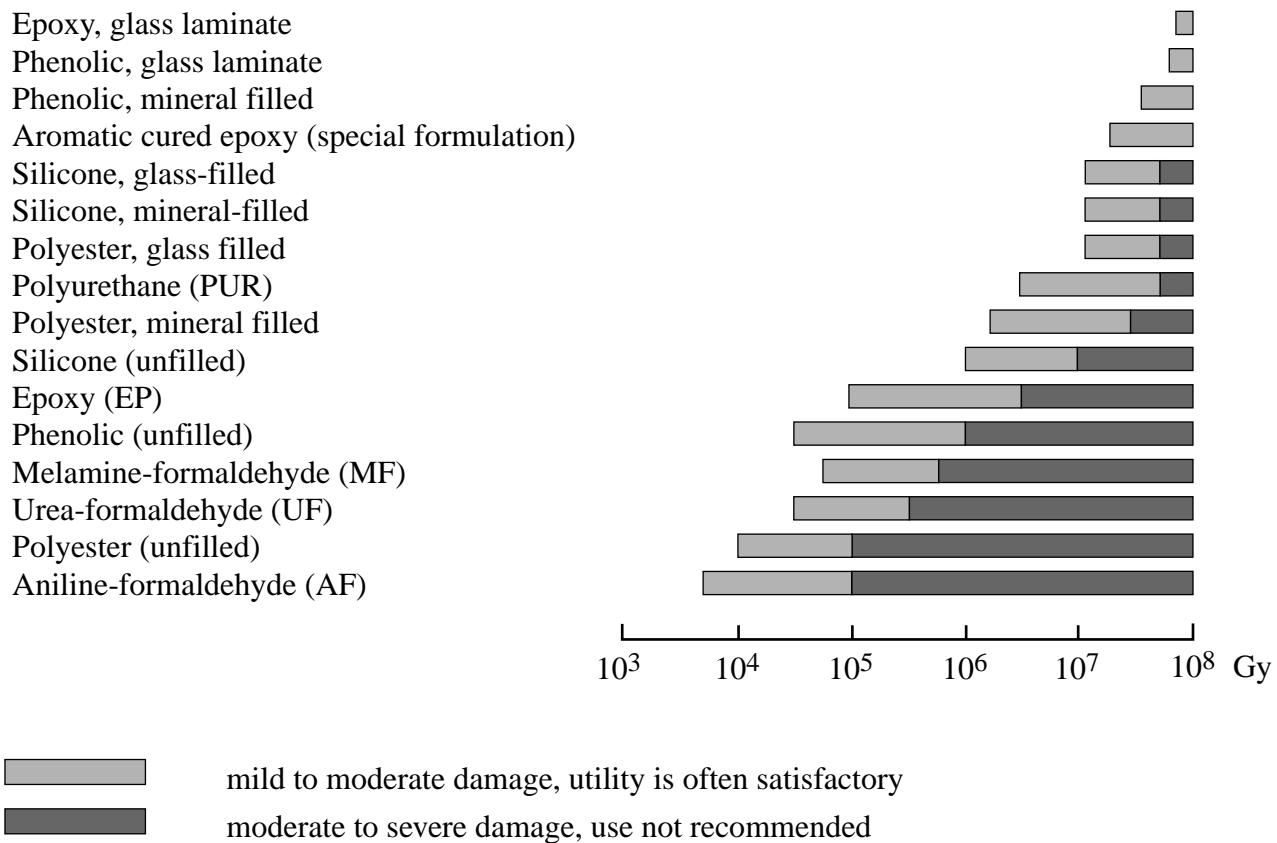
moderate to severe damage, use not recommended

These appreciations can only serve as a general guideline; environmental conditions such as temperature, humidity and dose rate, as well as additives influence the radiation behaviour of materials.

Fibre reinforced composites based on these resins can be at least one order of magnitude better.

**Table 2b**

General classification of thermoset resins and composites with respect to their radiation resistance



These appreciations can only serve as a general guideline; environmental conditions such as temperature, humidity and dose rate, as well as additives influence the radiation behaviour of materials.

Fibre reinforced composites based on these resins can be at least one order of magnitude better (see Appendix 3).

## APPENDIX 1

### List of materials presented in the previous volumes (Trade names in italics)

#### Volume I: Cable insulating materials (Ref. [24])

Butyl rubber	<i>Neoprene</i>
<i>Chlorostop</i>	<i>Nordel</i>
Chlorosulfonated polyethylene (CSP)	Polychloroprene
Cross-linked polyethylene (XLPE)	Polyethylene (PE)
<i>Desmopan</i>	Polyurethane (PUR)
Ethyl-acrylate rubber (EAR)	Polyvinyl chloride (PVC)
Ethylene-propylene diene rubber (EPDM)	<i>Pyrofil</i>
Ethylene-propylene rubber (EPR)	<i>Radox</i>
Ethylene vinyl acetate (EVA)	Semiconducting polyethylene
<i>Flamtrol</i>	Silicone rubber
Fluoropolymer	<i>Silythene</i>
<i>Halar</i>	<i>Stilan</i>
<i>Hypalon</i>	<i>Teflon</i>
<i>Hytrel</i>	<i>Tefzel</i>
<i>Kapton</i>	<i>Viton</i>
<i>Lupolen</i>	XLPE

#### Volume I, 2nd edition: Halogen-free cable-insulating materials (Ref. [27])

<i>Acorad</i>	Polyurethane (PUR)
<i>Afumex</i>	<i>Radox</i>
<i>Cogegum</i>	<i>Rheyhalon</i>
<i>Elastollan</i>	Semiconducting PE
Ethyl acrylate rubber (EAR)	<i>Silanpex</i>
Ethylene ethyl acrylate (EEA)	Silicone rubber (SiR)
Ethylene-propylene diene monomer rubber (EPDM)	<i>Silythene</i>
Ethylene-propylene rubber (EPR)	<i>Sioplas</i>
Ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA)	Thermoplastic rubber (TPR)
<i>Lupolen</i>	<i>Toxfree</i>
<i>Megolon</i>	VAC
Polyethylene (PE)	<i>Vamac</i>
Polyolefin (PO)	XLPE

## Volume II: Thermoplastic and thermosetting resins (Ref. [25])

<i>Araldite B</i>	<i>Makrolon</i>
<i>Araldite D</i>	<i>Novolac</i>
<i>Araldite F</i> and other <i>Araldite</i> resins	<i>Orlitherm</i>
<i>Araldite F + epoxy Novolac</i>	Phenolic resins
<i>Birakrit</i>	Polycarbonate resins
<i>Cevolit</i>	Polymide resins
<i>Crystic</i>	<i>Polylite</i>
<i>Dobeckan IF</i>	Polyurethane resins
<i>Dobeckot</i>	<i>Resofil</i>
<i>Epikote</i>	<i>Ryton</i>
Epoxy resins	<i>Samicanit</i>
Epoxy resins + epoxy <i>Novolac</i>	<i>Samicatherm</i>
<i>Etronax</i>	Silicone resins
<i>Isoval</i>	<i>Veridur</i>
<i>Kerimid</i>	<i>Vetresit</i>
<i>Kinel</i>	<i>Vetronite</i>

## Volume III: Accelerator engineering materials and components (Ref. [26])

Adhesive tape	<i>Hypermalloy</i>
Aluminium oxide	<i>Hytrel</i>
<i>Araldite</i>	Insulated wire
Asbestos cement	Insulating oil
Askarel	Insulating sleeve
<i>Buna</i>	Insultaing tape
Cable insulation	Iron
Cable tie	Joint
Ceramic	<i>Kapton</i>
Cerium-doped glass	<i>Kevlar</i>
Connector	<i>Kynar</i>
Copper wire	Lighting
<i>Diala C</i>	Lithium polysilicate
Diester oil	Lubricating oil
Electronic components	Luminous paint
Epoxy resin	<i>Lupolen</i>
Ethylene-propylene rubber (EPR) and (EPDM)	Magnet coil insulation
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer (ETFE)	Magnetic material
Fluorinated oil	<i>Makrolon</i>
Fluorinated polymer	<i>Micatherm</i>
Foam	Microswitch
Glass	Mineral oil
Glass fibre	Motor, electric
Heating element	<i>Mylar</i>
HF absorber	<i>Neoprene</i>
Hoses	Nitrile-butadiene rubber
<i>Hostalen</i>	<i>Nomex</i>

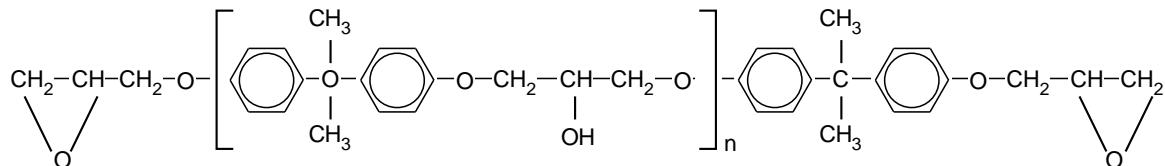
<i>Noryl</i>	Tape
<i>Novolac</i>	<i>Teflon</i> (PTFE)
<i>Nylon</i>	<i>Tefzel</i>
Oil	Terminal board
Optical fibre	Textile
O-ring	Thermoplastic resin
Pain	Thermosetting resin
Paper	Thermoshrinking sheath
Particle detector	Vacuum chamber tube
<i>Pertinax</i>	Vacuum gasket
<i>Plexiglas</i>	Vacuum pump accessory
Polyacrylate	Vacuum seal
Polyamide	Vacuum valve
Polybutylene terephthalate (PBTP)	<i>Valvata</i>
Polycarbonate	Valve
Polychloroprene ( <i>Neoprene</i> )	<i>Vestolene</i>
Polyester resin	<i>Viton</i>
Polyethylene (PE) and (XLPE)	Wire
Polyethylene terephthalate (PETP)	Wood
Polyhydantoin	
Polyimide	
Polyolefin	
Polyphenylene oxide (PPO)	
Polyphenylene sulfide (PPS)	
Polypropylene (PP)	
Polysiloxane	
Polytetrafluoroethylene ( <i>Teflon</i> PTFE)	
Polyurethane resin (PUR)	
Polyvinyl chloride (PVC)	
Polyvinyl toluene	
Quartz	
Relay	
Resin	
<i>Resistofol</i>	
Rubber	
<i>Ryton</i>	
Scintillator	
<i>Scotchcal</i>	
Seal (O-ring)	
Silica	
Silicon detector	
Silicone oil	
Silicone rubber	
Sleeve	
Styrene-butadiene rubber (SBR)	
Switch	

## APPENDIX 2

### Chemical structures of some commercial products

**BF<sub>3</sub>MEA** Boron trifluoride monoethylamine: BF<sub>3</sub>-NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>

**CT 200** (CIBA-GEIGY), Araldite B, solid, unmodified epoxy resin based on Bisphenol A:



**CY 205** (CIBA – GEIGY) Liquid, unmodified epoxy resin based on Bisphenol A

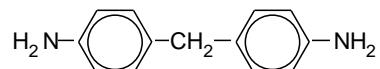
**CY 208** (CIBA – GEIGY) Liquid, modified epoxy resin based on Bisphenol A

**CY 221** (CIBA – GEIGY) Liquid, modified epoxy resin based on Bisphenol A

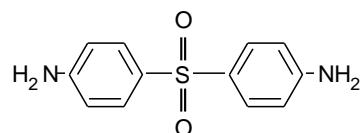
**CY 222** (CIBA – GEIGY) Liquid, modified epoxy resin based on Bisphenol A

} Chemical formula  
see CT 200( $n \approx 0.15$ )

**DDM** (CIBA-GEIGY) Hardener – 4,4' – Diaminodiphenylmethane (methylenedianiline MDA):

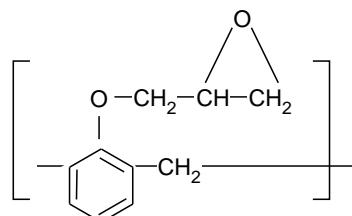


**DDS** Hardener – Diaminodiphenyl sulphone:

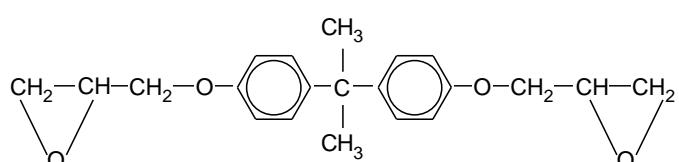


**DEN** (DOW) Dow Epoxy Novolac

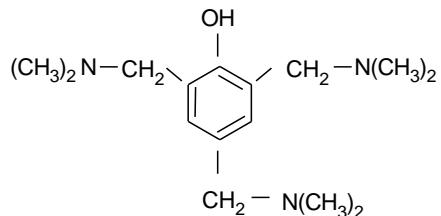
**431**  
**438**} Polyglycidyl ether of phenol formaldehyde novolac



**DGEBA** Diglycidyl ether of Bisphenol A:



DMP 30 Accelerator – 2, 4, 6-tris[N,N-(dimethylamino)methyl]phenol



DX 126 (SHELL)  
DX 127 (SHELL)

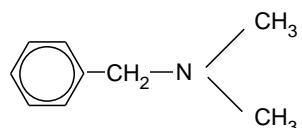
Curing agent – anhydride

DX 125 (SHELL)

DY 040 (CIBA-GEIGY) flexibilizer – polypropyleneglycol

061 accelerator – aminophenol

062 accelerator – benzylidemethylamine



063 accelerator

064 accelerator – aminophenol

065 accelerator unmodified sodium alkoxide

067 accelerator modified        "        "

EP (SHELL)

EPIKOTE

154 Polyglycidyl ether of phenol formaldehyde novolac  
827 (Chemical formulae see DEN)

828 Diglycidyl ether of Bisphenol A (see DGEBA)

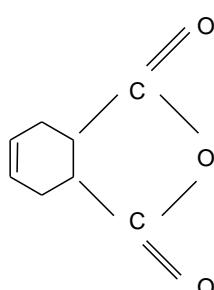
EPN (CIBA-GEIGY)

Epoxy Phenol Novolac

1138 Polyglycidyl ether of phenol formaldehyde novolac  
1139 (Chemical formulae see DEN)

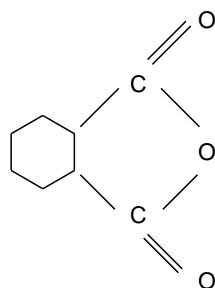
HT 903 (CIBA-GEIGY) Acid anhydride hardener, solid, modified

Tetrahydropthalic anhydride



HT 907 (CIBA-GEIGY) Acid anhydride hardener, solid, unmodified

Hexahydrophthalic anhydride

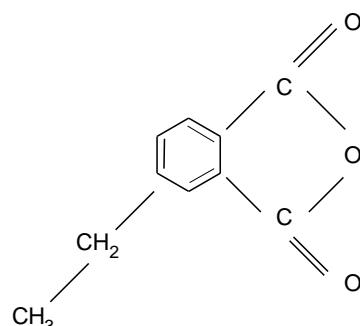


HT 972 (CIBA-GEIGY) Amine hardener, solid, unmodified (see DDM)

HY 905 (CIBA-GEIGY) Acid anhydride hardener, liquid, modified  
Hexahydrophthalic anhydride (see HT 907)

HY 906 (CIBA-GEIGY) Acid anhydride hardener, liquid, unmodified

Methyl nadic anhydride (MNA)

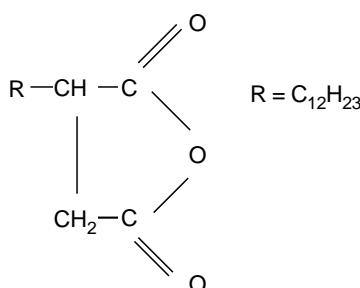


HY 956 (CIBA-GEIGY) Amine hardener, liquid, modified

Triethylenetetramine H<sub>2</sub>N [CH<sub>2</sub> – CH<sub>2</sub> – NH] CH<sub>2</sub> – CH<sub>2</sub> – NH<sub>2</sub>

HY 964 (CIBA-GEIGY) Acid anhydride hardener

Dodecenyl succinic anhydride



MDA

Hardener

Methylenedianiline (see DDM)

MNA

Hardener

Methyl nadic anhydride (formula see HY 906)

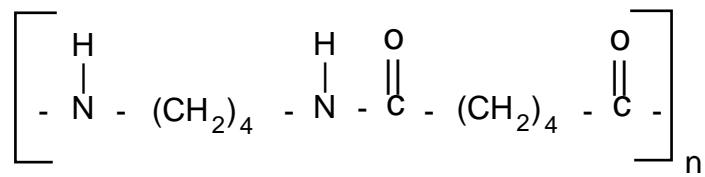
MY 720 (CIBA-GEIGY) Liquid, unmodified, epoxy resin

Tetrafuncional glycidyl compound of diamines (TGDM)

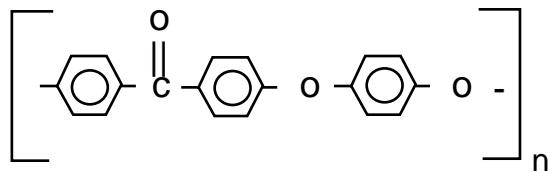
MY 740 (CIBA-GEIGY) Liquid, modified epoxy resin based on Bisphenol A  
(see CY 205)

MY 745 (CIBA-GEIGY) Liquid, modified epoxy resin based on Bisphenol A  
(see CY 208, 221 and 222)

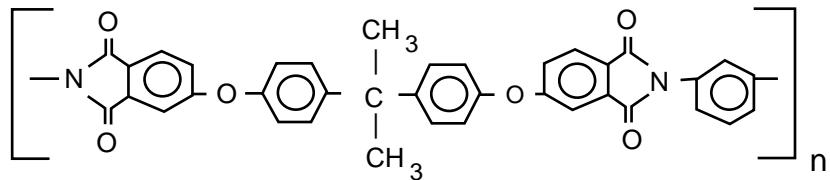
PA 4.6



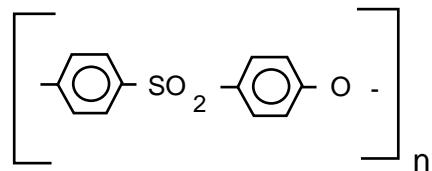
PEEK



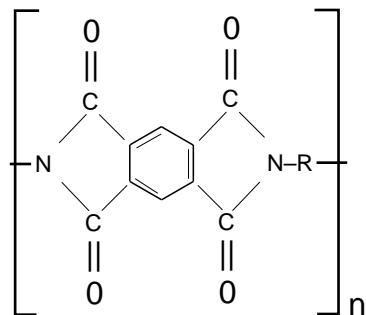
PEI



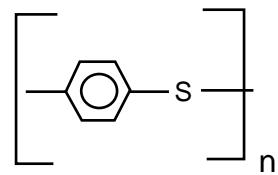
PES



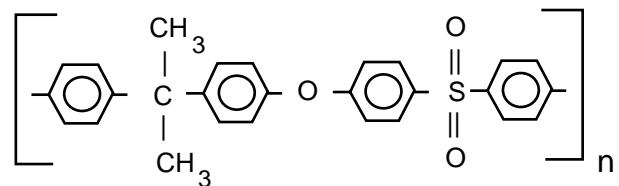
PI



PPS

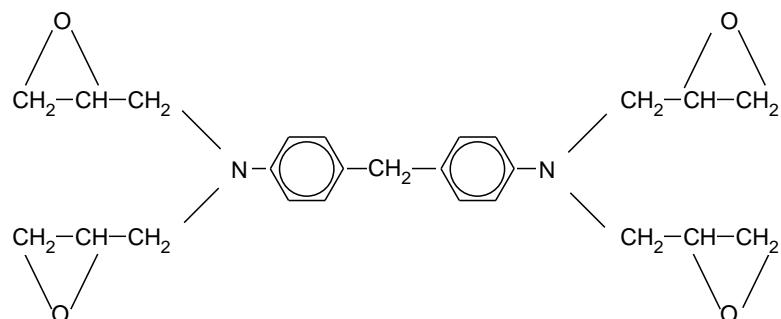


PSU



TGDM

N,N'-tetraepoxypropyl-4,4'-methylenedianiline



XB 2687 (CIBA-GEIGY) Accelerator, liquid modified, replacement for DY 063  
Amine-phenol salt